

# 三类抗性种子萌发对酸雨胁迫响应

周 青<sup>1</sup>, 曾庆玲<sup>1</sup>, 黄晓华<sup>2</sup>, 张光生<sup>1</sup>, 梁婵娟<sup>1</sup>, 王丽红<sup>1</sup>

(1 江南大学工业生物技术教育部重点实验室, 无锡 214036; 2 南京师范大学化学与环境科学学院, 南京 210097)

**摘要:** 实验采用 pH2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、5.0 模拟酸雨处理培养皿中的水稻 (*Oryza sativa*)、小麦 (*Triticum aestivum*)、油菜 (*Brassica chinensis* var. *oleifera*) 3 类抗性种子, 每皿 50 粒, 置恒温培养箱内萌发 (25℃), 每天更换 1 次酸雨, 处理与对照均 3 次重复。定时测定酸雨胁迫强度、胁迫时间对种子发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、异状发芽率, 吸水值、呼吸速率、贮藏物质运转效率、贮藏物质消耗率、根长抑制指数与芽长抑制指数的影响。结果表明, 当酸雨胁迫强度 pH=2.0~2.5 时, 因胁迫强度过高, 3 类抗性种子皆不萌发; 胁迫强度 pH $\geq$ 3.0 时, 3 类抗性种子 5 项萌发指标的变幅是水稻<小麦<油菜; 酸雨伤害阈值是水稻 (pH3.0~3.5)<小麦 (pH3.5~4.0)<油菜 (pH4.0~5.0); 当胁迫强度 (pH) $\geq$ 2.5 时, 3 类抗性种子 6 项生理指标的变幅是水稻<小麦<油菜, 其生理反应阈值 (pH $\geq$ 2.0)<萌发反应阈值 (pH $\geq$ 3.0); 3 类抗性种子贮藏物质消耗率、贮藏物质运转率, 根长抑制指数及芽长抑制指数对酸雨胁迫时间的响应 (组间达到差异显著水平) 时间是: 水稻 (7 d, 7 d, 3 d, 3 d)  $\geq$  小麦 (6 d, 6 d, 3 d, 3 d)  $\geq$  油菜 (3 d, 4 d, 3 d, 3 d); 3 类抗性种子对酸雨胁迫强度与胁迫时间的耐受性差异 (水稻>小麦>油菜) 是其抗性分异的根本原因。

**关键词:** 酸雨胁迫; 水稻; 小麦; 油菜; 萌发

## Effects of acid rain on seed germination of various acid-fast plant

ZHOU Qing<sup>1</sup>, ZENG Qing-Ling<sup>1</sup>, HUANG Xiao-Hua<sup>2</sup>, ZHANG Guang-Sheng<sup>1</sup>, LIANG Chan-Juan<sup>1</sup>, WANG Li-Hong<sup>1</sup> (1. The Key Laboratory of Industrial Biotechnology, Ministry of Education, Southern Yangtze University, Wuxi 214036, China; 2. College of Chemistry and Environment Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(9): 2029~2036.

**Abstract:** The responses of seed germination of 3 kinds of seeds on acid rain stress, in which rice (*Oryza sativa*), wheat (*Triticum aestivum*) and rape (*Brassica chinensis* var. *oleifera*) seeds were used as experimental materials, were investigated. The purpose was to understand the effects of acid rain on seed germination of various acid-fast plants in acidic deposition area and to determine the reasons of the reasons of growth and decline dynamics of crop population and its yield change. Six simulated acid rain (SAR) solutions of pH 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 and 5.0 and neutral solution (pH6.5) as control group were used in this study. Pretreatment seeds of three species were placed in culture dishes with filter sheets to germinate in a culture container kept at a constant temperature of 25℃, in which each treatment group involved three dishes and each dish received 50 seeds. During germination, seeds were exposed to simulated acid rain that was replaced everyday. The germination indexes (percentage germination, germination energy, germination index, vigor index, percentage of abnormal germination) and physiological activities indexes (water absorption rate, respiratory rate, storage reserve loss rate, storage reserve transformation rate, inhibition index of root length, inhibition index of shoot length) were all studied under acid rain stress in both experiments. The results showed that seed germination was inhibited significantly in high acidity strength (pH2.0~2.5) for the three species. When pH $\geq$ 3.0, the former four germination indexes of the three species increased in relation with decreasing acidity strength. The amplitude difference of each index was that rice (4.00%, 4.00%, 8.60%, 35.90%,

基金项目: 国家计委基金资助项目 (GJX01100626); 江苏省科技厅基金资助项目 (BG2001045)

收稿日期: 2003-11-08; 修订日期: 2004-05-20

作者简介: 周青 (1959~), 男, 安徽淮南人, 教授, 主要从事环境生态学与污染生态学。E-mail: zhouqeco@yahoo.com.cn

**Foundation item:** the project of State Planning Committee (No. GJX01100626), the project of Science and Technology Committee of Jiangsu Province (No. BG2001045)

Received date: 2003-11-08; Accepted date: 2004-05-20

**Biography:** ZHOU Qing, Professor, mainly engaged in environmental ecology and pollution ecology. E-mail: zhouqeco@yahoo.com.cn

respectively) < wheat (10.00%, 9.33%, 12.91%, 51.60%, respectively) < rape (16.67%, 10.67%, 21.44%, 54.71%, respectively). In contrast, the percentage of abnormal germination of rice and wheat decreased with decreasing acidity strength. The injury threshold values were rice (pH3.0~3.5) < wheat (pH3.5~4.0) < rape (pH4.0~5.0). About pH2.5~5.0, the experimental data of physiological aspects (water absorption rate, respiratory rate, storage reserve loss rate, storage reserve transformation rate) were the similar. The amplitude difference of each index were rice (4.84%, 73.03%, 6.88%, 9.21%, respectively) < wheat (6.65%, 83.87%, 12.45%, 13.07%, respectively) < rape (10.38%, 87.50%, 12.56%, 15.70%, respectively). At pH range of 3.0~5.0, the maximum extent of inhibition against acid rain on root and shoot was that rice (78.66%, 12.84%, respectively) < wheat (80.89%, 34.32%, respectively) < rape (85.07%, 56.36%, respectively). In other acidity strength, the extent of inhibition trend was also observed. The threshold value of physiological activities (pH $\geq$ 2.0) was lower than that of germination (pH $\geq$ 3.0). The responses on acid rain stress of storage reserve loss and transform rate, inhibition index of root and shoot length of the three species indicated that the significant difference of each indexes was perceptible between treatment groups was that rice (7d, 7d, 3d, 3d) $\geq$ wheat (6d, 6d, 3d, 3d) $\geq$ rape (3d, 4d, 3d, 3d). The experimental data further evidenced that plants could display different sensitivity under acid rain stress, in which rice had stronger resistance than wheat, and rape was more susceptible to acid rain than rice and wheat.

**Key words:** acid rain stress; rice; wheat; rape; germination

文章编号:1000-0933(2004)09-2029-08 中图分类号:Q948,X517 文献标识码:A

种子萌发是植物生命历程的起点,其萌发率高低、萌发参数改变、萌发生理进程等皆关乎植物后期生育状况,生物量丰寡,种群动态乃至竞争格局的走向。Bosley 等人<sup>[1]</sup>研究了 pH2.0~4.0 模拟酸雨对 *Athyrium felix-femina* 与 *Onoclea sensibilis* 孢子萌发率的影响,结果显示 pH2.0 的酸雨完全抑制孢子萌发,pH3.0 时孢子发芽率为 6.0%~20.0%,pH4.0 以上时,2 种植物的发芽率与对照无差异;Park 等人<sup>[2]</sup>报道了模拟酸雨(pH3.0~5.6)对 *Arabidopsis thaliana* 种子萌发与根、芽生长影响,结果证明,pH3.0 酸雨使种子萌发及根、芽生长严重受阻,pH $\geq$ 5.6 时,酸雨的上述抑制效应解除;其后 Hou 等人<sup>[3]</sup>实施的模拟酸雨对 5 种阔叶树种子萌发、幼苗生长影响实验得到类似结论。在粮食作物方面,李荣生、聂呈荣、彭彩霞等人<sup>[4-6]</sup>探讨了模拟酸雨对蔬菜、花生、水稻、小麦、玉米种子萌发、幼苗根系生长及光合作用影响,获得了酸雨对实验作物种子萌发的伤害阈值及剂量-效应参数。以上研究虽掌握了若干酸雨影响不同生活型种子萌发的生理生态信息,但与酸雨对植物生长发育,种群与群落动态,生态系统结构与功能的研究相比,似显不够系统和深入,多数工作很少考虑不同抗性种子各项萌发参数,以及种子组成与萌发过程中内在变化对酸雨胁迫的反应<sup>[7]</sup>。因此,研究不同抗性种子萌发及生态生理过程对酸雨胁迫伤害的应激反应显得尤为重要。本试验以抗酸雨植物水稻(*Oryza sativa*)、中等抗性植物小麦(*Triticum aestivum*)和敏感性植物油菜(*Brassica chinensis* var. *oleifera*)种子为试材<sup>[8]</sup>,系统研究了 3 类抗性种子萌发过程对酸雨胁迫强度与胁迫时间的差异反应,为微观上揭示酸雨伤害植物机理,植物抗逆性的基因修饰与筛选;宏观上进一步认识酸化环境下植物种群数量动态,群落波动、演替的潜在原因,以及正确评估酸雨给农林业生产造成的经济损失等提供基础实验依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 模拟酸雨配制

模拟酸雨(含离子构成,以下简称酸雨)配制参照文献<sup>[9]</sup>,先配制 pH 1.0 酸雨母液,其中硫酸根和硝酸根体积比为 4.7:1。以蒸馏水将母液调制成 pH2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、5.0 酸雨,并经 PHS-29A 酸度计(上海精密科学仪器有限公司)校准。

### 1.2 材料处理方法

将水稻(新品 5356)、小麦(扬麦 58)、油菜(淮杂油一号)种子用 0.1% 升汞消毒 8 min,去离子水冲洗数次,从中取 50 粒种子均匀排列在直径 12 cm、垫有 2 层滤纸的培养皿中,以 pH 2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、5.0 酸雨进行胁迫处理,对照(CK)是与母液离子成分相同的中性溶液(pH6.5),置恒温培养箱中(25 $\pm$ 0.5 C),每处理 3 皿,每天更换溶液,统计发芽数,萌发 1 周。

以 pH 3.0、3.5、4.0 酸雨进行胁迫处理,对照(CK)是与母液离子成分相同的中性溶液(pH6.5)。将培养皿置于恒温培养箱中(25 $\pm$ 0.5 C)中浸种萌发,每天更换溶液 1 次,1 周结束萌发实验。酸雨胁迫 3d 起,每处理每天取样 3 皿,测量每粒发芽种子的芽长、根长,测量每皿发芽种子的各部分干重,至萌发实验结束,对数据进行统计处理。

### 1.3 测试方法

种子活力测定按种子检验原理和技术<sup>[10]</sup>进行:

发芽指数  $Gt = \sum (Gt/Dt)$ , 式中  $Gt$  为在不同时间的发芽数,  $Dt$  为相应的发芽日数。

活力指数  $VI = S \times \sum (Gt/Dt)$ ,  $S$  为一定时期内幼苗生长势,以每株苗的平均鲜重( $FW$ )表示。

吸水值 通过比较种子浸泡前后重量差并与种子浸泡前比较而得出<sup>[11]</sup>。

呼吸速率 参照文献<sup>[12]</sup>,植物种子萌发 3 d,用 DDS-307 型电导率仪(上海伟业仪器厂)测定种子的呼吸速率( $\text{mg CO}_2/(\text{gFW} \cdot \text{h})$ )。

贮藏物质消耗率和运转效率 贮藏物质消耗率( $\%$ )=(发芽前种子重量-发芽种子各部分干重)/发芽前种子重量 $\times 100$ ;贮藏物质运转效率( $\%$ )=苗干重(芽+根)/苗各部分干重(芽+根+籽粒) $\times 100$ <sup>[13]</sup>。

抑制指数 测量每苗芽长和根长,根(芽)长抑制指数以平均根(芽)长计,抑制指数( $\%$ )=(CK 长度-处理长度)/CK 长度 $\times 100$ <sup>[14]</sup>。

## 2 实验结果

### 2.1 酸雨对 3 类种子萌发影响

2.1.1 对种子发芽率影响 发芽率是反映种子品质优劣的重要指标。表 1 数据显示,酸雨强度为  $\text{pH}2.0\sim 2.5$  时,3 类抗性植物种子发芽率均为零,酸雨强度( $\text{pH}$ ) $\geq 3.0$  时,3 者发芽率均随  $\text{pH}$  上升而增加,并与  $\text{pH}$  呈显著正相关( $r=0.9959, 0.9867, 0.9887$ );从发芽率降幅看, $\text{pH}3.0$  酸雨使水稻发芽率下降 2.67%,与 CK 差异不显著。小麦与油菜则不然,等强度酸雨胁迫下,降幅分别达 8.67%、15.33%,呈差异显著水平;发芽率变幅比较( $\text{pH}3.0\sim 5.0$ )同样显示,水稻为 4.0%,明显低于小麦(10.00%)、油菜(16.67%)。上述结果表明,水稻、小麦和油菜种子萌发对酸雨耐受性不同,水稻耐酸雨胁迫能力 $>$ 小麦 $>$ 油菜。

2.1.2 对种子发芽势影响 发芽势是表征种子活力指标。 $\text{pH}2.0\sim 2.5$  时,水稻、小麦和油菜种子发芽势为零。 $\text{pH}\geq 3.0$  时,三者发芽势随  $\text{pH}$  上升而增加,发芽势与  $\text{pH}$  呈显著正相关( $r=0.9986, 0.9665, 1.000$ ); $\text{pH}3.0$  时,水稻发芽势下降 0.67%,与 CK 差异不显,而小麦与油菜发芽势分别下降 6.67%与 8.00%,达差异显著水平;发芽势变幅( $\text{pH}3.0\sim 5.0$ ),水稻 4.67%,明显低于小麦(9.33%)、油菜(10.67%), $\text{pH}5.0$  时,水稻发芽势高于 CK 4.00% $>$ 小麦(3.33%) $>$ 油菜(2.00%),再次证明水稻抗酸雨能力 $>$ 小麦 $>$ 油菜(表 1)。

2.1.3 对发芽指数和活力指数影响 发芽指数与活力指数是反映种子活力的综合指标。酸雨胁迫下,2 项指标变律与发芽率有相同变化(表 1)。 $\text{pH}3.0\sim 5.0$  时,3 类种子发芽指数与活力指数和  $\text{pH}$  呈显著正相关( $r=0.9817, 1.000, 0.9948, 0.9908, 0.9985, 0.9823$ ); $\text{pH}3.0$  时,水稻 2 项指标降幅(8.89%, 35.90%) $<$ 小麦(12.60%, 46.00%) $<$ 油菜(17.45%, 47.65%),均与 CK 差异明显;2 项指标变幅( $\text{pH}3.0\sim 5.0$ )同样是水稻(8.60%, 35.90%) $<$ 小麦(12.91%, 51.60%) $<$ 油菜(21.44%, 54.71%),且高强度酸雨( $\text{pH}3.0\sim 3.5$ )胁迫下更为明显(水稻 2.92%、10.90% $<$ 小麦 7.92%、24.0% $<$ 油菜 14.92%、40.46%),证明水稻种子抗酸雨能力强于油菜。

2.1.4 对种子异状发芽率影响 异状发芽率指只长出胚芽而无胚根(或胚根生长异常)的种子数占供试种子数之百分比,表示逆境对种子萌发伤害效应。实验表明,随酸雨( $\text{pH}2.5\sim 5.0$ )强度降低,水稻与小麦异状发芽率呈下降趋势, $\text{pH}2.5$  时,水稻异状发芽率高达 90%, $\text{pH}3.0$  陡降至 4.67%,小麦则从 40.67%降至 12.67%; $\text{pH}\geq 3.5$  后,水稻与小麦异状发芽与 CK 几乎无差别。油菜种子在  $\text{pH}2.5$  时多数已经死亡,少数异状发芽种子在萌发实验结束时也致死。水稻异状发芽种子在胁迫萌发实验结束、转为与 CK 相同条件时,仍能长出胚根,恢复生长。反映出水稻小麦耐酸雨冲击能力强于油菜(表 1)。

### 2.2 酸雨对 3 类种子萌发生理的影响

种子萌发的生理基础是胚细胞内各种生理活动由静态转为动态,对其进行分析有助于获得更多影响种子萌发的信息。

2.2.1 对种子吸水值影响 表 2 数据显示,不同  $\text{pH}$  酸雨处理水稻、小麦与油菜种子其吸水值均随  $\text{pH}$ (2.0~5.0)增加而增大,三者吸水值与  $\text{pH}$  呈显著正相关( $r=0.9597, 0.9928, 0.9720$ ),唯在增幅与增速(与 CK 差值)上存在差异。 $\text{pH}$  从 2.0 升至 5.0 时,3 类种子吸水值增幅分别为 4.84%、6.65%和 10.38%,但增速,尤其是低  $\text{pH}$ (2.0~3.0)酸雨胁迫下的增速,水稻(-1.71%) $>$ 小麦(-1.99%) $>$ 油菜(-8.35%),虽然此强度酸雨对水稻、小麦与油菜吸水值都有显著抑制效应,但水稻种子水分代谢对酸雨胁迫的适应性反应速度优于小麦与油菜。

2.2.2 对种子呼吸速率影响 呼吸速率是种子萌发过程中能量代谢状态,或组织损伤程度的间接反映。在不同  $\text{pH}$ (2.0~5.0)酸雨胁迫下,水稻、小麦和油菜种子呼吸速率均发生明显改变,且与  $\text{pH}$  呈显著正相关( $r=0.9865, 0.9988, 0.9889$ ); $\text{pH}$  从 5.0 降至 2.0 时(表 2),水稻呼吸速率(73.07%)下降 $<$ 小麦(83.87%) $<$ 油菜(87.50%),尤其在高强度酸雨( $\text{pH}2.0\sim 3.0$ )胁迫下,三者呼吸速率与 CK 相比,均达差异显著水平,但水稻呼吸速率变幅(23.07%) $<$ 小麦(25.81%) $<$ 油菜(56.25%),表明酸雨对水稻与小麦能量代谢的干扰小于油菜。

2.2.3 对种子贮藏物质消耗率与运转效率影响 表 2 数据说明,随  $\text{pH}$ (2.0~5.0)上升,水稻、小麦贮藏物质消耗率和运转效率都呈增加趋势,且与  $\text{pH}$  呈显著正相关( $r=0.9815, 0.9934, 0.9620, 0.9747$ )。而油菜 2 项指标变化呈明显消长态势,即贮藏物质消耗率与呼吸速率相关( $r=-0.9962$ ),运转效率与  $\text{pH}$  呈正相关( $r=0.9840$ )。低  $\text{pH}$  值(2.0~3.0)条件下油菜种子呼吸增强,储藏物质消耗增加,外输减少,暗示此时生理代谢出现紊乱,或大量物质用以损伤胚细胞的修复;从贮藏物质运转效率改变

走向看, pH3.0 时, 水稻运转效率降幅(8.44%) < 小麦(13.17%) < 油菜(16.05%); pH3.0~5.0 时, 水稻变幅(9.21%) < 小麦(13.07%) < 油菜变幅(15.70%), 表明水稻种子萌发过程中, 贮藏物质转运效率对酸雨胁迫耐受强度 > 油菜。

表 1 酸雨对种子萌发的影响

Table 1 The effects of acid rain on germination of plant seeds

处理(pH) Treatment	发芽率(%) Percentage germination	发芽势(%) Germination energy	发芽指数 Germination index	活力指数 Vigor index	异状发芽率(%) Percentage of abnormal germination	
I	CK	96.00a	92.00a	31.49(100.00)a	3.76(100.00)a	1.33a
	2.0	0.00b	0.00b	0.00(0.00)c	0.00(0.00)d	0.00a
	2.5	0.00b	0.00b	0.00(0.00)c	0.00(0.00)d	90.00c
	3.0	93.33a	91.33a	28.69(91.11)b	2.41(64.10)c	4.67b
	3.5	94.67a	92.00a	29.60(94.03)ab	2.82(75.00)b	1.33a
	4.0	95.33a	92.67a	31.09(98.73)a	3.43(91.22)a	1.33a
	5.0	97.33a	96.00a	31.40(99.71)a	3.76(100.00)a	1.33a
II	CK	92.67a	90.67a	29.05(100.00)a	5.00(100.00)a	2.00a
	2.0	0.00d	0.00d	0.00(0.00)d	0.00(0.00)d	0.00a
	2.5	0.00d	0.00d	0.00(0.00)d	0.00(0.00)d	40.67c
	3.0	84.00c	84.00c	25.39(87.40)c	2.70(54.00)c	12.67b
	3.5	88.00b	87.33b	27.69(95.32)b	3.90(78.00)b	6.00a
	4.0	93.33a	92.67a	29.09(100.14)a	4.92(98.40)a	3.33a
	5.0	94.00a	93.33a	29.14(100.31)a	5.28(105.60)a	2.00a
III	CK	85.33a	75.33a	33.58(100.00)a	3.40(100.00)a	0.00a
	2.0	0.00d	0.00d	0.00(0.00)d	0.00(0.00)d	0.00a
	2.5	0.00d	0.00d	0.00(0.00)d	0.00(0.00)d	0.00a
	3.0	70.00c	67.33c	27.72(82.55)c	1.78(52.35)c	0.00a
	3.5	82.00b	74.00a	32.73(97.47)a	3.25(95.59)a	0.00a
	4.0	85.33a	78.00b	34.58(102.98)b	3.57(105.00)b	0.00a
	5.0	86.67a	78.00b	34.92(103.99)b	3.64(107.06)b	0.00a

表中所列数据均为平均数, 括号内为相对百分含量; 同一列中不同的字母表示不同处理间差异显著性统计( $P < 0.05$ ); I 水稻, II 小麦, III 油菜; 下同 The data in the table were averages and the data in the brackets were relative values; Significantly difference at  $P < 0.05$  with different letter in the same line. I rice, II wheat, III rape; The same below

**2.2.4 对水稻、油菜种子抑制指数的影响** 抑制指数直观反映出酸雨对种子萌发的抑制强度。表 2 数据指出, 酸雨对水稻、小麦与油菜根、芽抑制强度随 pH(2.0~5.0) 上升减弱, 呈显著负相关( $r = -0.9794, -0.9768, -0.9825, -0.9563, -0.9634, -0.9974$ )。pH2.5 时, 水稻根、芽抑制指数(100.0%, 86.11%) < 小麦(100.0%, 95.90%) < 油菜(100.0%, 100.0%); pH3.0~5.0 时, 酸雨对水稻根、芽最大抑制强度(78.66%, 12.84%) < 小麦(80.89%, 34.32%) < 油菜(85.07%, 56.36%); 各胁迫强度下, 水稻根、芽抑制指数 < 小麦 < 油菜。说明水稻抗酸雨能力高于油菜。至于两者根长抑制指数 > 芽长抑制指数, 或与酸雨对根系直接胁迫、对芽生长间接伤害有关。

### 2.3 酸雨胁迫时间对种子萌发的影响

**2.3.1 胁迫时间对种子贮藏物质消耗率影响** 图 1 数据显示, 酸雨胁迫强度(pH)一定时, 伴随胁迫时间( $t=d$ )延长, 3 类种子贮藏物质消耗率(简称“消耗率”)皆呈递增趋势, 不同的是水稻与小麦消耗率 < CK, 而油菜 > CK。当  $t=7$  d 时, 不同胁迫强度下消耗率增幅及与 CK 的差值是水稻(11.03%, 12.44%, 13.14%, -4.10%, -2.09%, -1.15%) < 小麦(15.69%, 23.47%, 23.81%, -12.09%, -2.70%, -1.54%)。结合油菜种子消耗率及其增幅始终 > CK 的代谢异常事实, 足以窥见油菜抗酸雨胁迫能力 < 小麦 < 水稻。再由 CK 与各胁迫强度消耗率达到差异显著水平所需的胁迫时间看, 水稻(7 d) > 小麦(6 d) > 油菜(3 d), 同样说明 3 类种子贮藏物质消耗过程耐酸雨胁迫能力是水稻 > 小麦 > 油菜。

**2.3.2 胁迫时间对种子贮藏物质运转率影响** 由图 2 可知, 与胁迫时间( $t=d$ )对种子消耗率有相同的影响, 3 类种子贮藏物质运转率(下称“运转率”)均随胁迫时间延长而呈上升趋势, 然其增幅 < CK。当  $t=7$  d 时, 不同胁迫强度下水稻运转率增幅及运转率与 CK 差值分别是 24.80%, 29.37%, 29.72%, -7.04%, -1.85%, -0.80% < 小麦 26.33%, 37.87%, 38.87%, -23.86%, -9.16%, -2.56%, 油菜 2 项指标则小于水稻, 估计与其消耗率变化相关。由此得知, 酸雨对水稻种子运转率影响 < 小麦, 或水稻萌发抗酸雨胁迫能力 > 小麦。从 CK 与各胁迫强度运转率达到差异显著水平所需的胁迫时间看, 水稻(7 d) > 小麦(6 d) > 油菜(4 d), 说明 3 类种子萌发时贮藏物质运转过程耐酸雨胁迫能力存在明显差异, 表现为水稻 > 小麦 > 油菜。

表 2 酸雨对种子生理活动的影响

Table 2 The effects of acid rain on physiological activities of plant seeds

处理(pH)	吸水值(%)	呼吸速率	贮藏物质消耗率	贮藏物质运转率(%)	芽长抑制指数(%)	根长抑制指数(%)	
Treatment	Water absorption rate	Respiratory rate	(%)Storage reserve loss rate	Storage reserve transform rate	Inhibition index of shoot	Inhibition index of root	
I	CK	36.14a	0.26(100.00)a	31.46a	33.65a	0.00a	0.00a
	2.0	30.40d	0.06(23.08)e	24.35c	0.00d	100.00e	100.00d
	2.5	33.64c	0.10(38.46)d	25.07c	6.14c	86.11d	100.00d
	3.0	34.43bc	0.12(46.15)d	28.56b	25.21b	12.84c	78.66c
	3.5	34.91b	0.16(61.54)c	29.52b	28.49be	8.28b	36.49b
	4.0	35.11ab	0.22(84.62)b	30.41ab	31.17ae	0.84a	0.92a
II	CK	60.39a	0.31(100.00)a	27.16a	46.35a	0.00a	0.00a
	2.0	53.77d	0.04(12.90)f	12.69e	0.00d	100.00f	100.00e
	2.5	55.52c	0.07(22.58)e	15.33d	2.84d	95.90e	100.00e
	3.0	58.40b	0.11(38.71)d	20.83c	33.18c	34.32d	80.89d
	3.5	59.21b	0.16(51.61)c	23.48b	40.23b	15.43c	40.87c
	4.0	60.39a	0.21(67.74)b	25.22b	45.51a	3.72b	3.15b
III	CK	93.21a	0.16(100.00)a	16.74a	43.18a	0.00a	0.00a
	2.0	81.34d	0.04(25.00)e	28.60d	0.00e	100.00e	100.00f
	2.5	82.27d	0.07(43.75)d	30.03d	0.00e	100.00e	100.00f
	3.0	84.86c	0.13(81.25)c	25.02c	27.13d	56.36d	85.07e
	3.5	86.17c	0.15(93.75)a	21.20b	39.23c	17.51c	44.32d
	4.0	90.67b	0.16(100.00)a	19.87b	41.96b	5.76b	17.80c
5.0	91.72ab	0.18(112.50)b	17.47a	42.83ab	0.49a	3.46b	

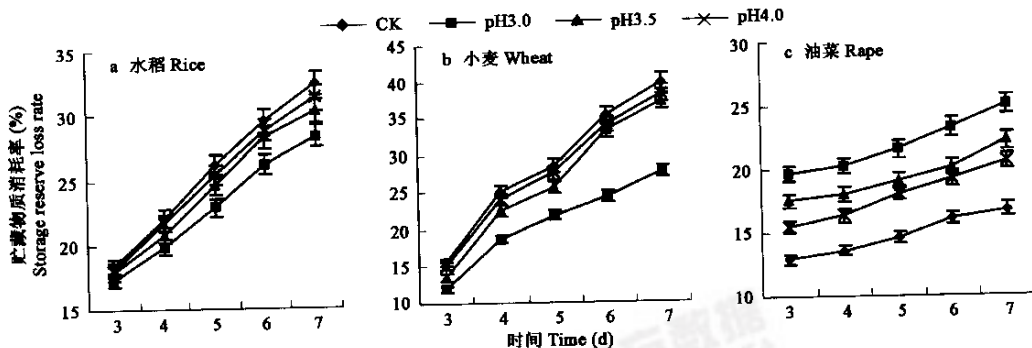


图 1 酸雨胁迫时间对种子贮藏物质消耗率影响

Fig. 1 Effect of acid rain on storage reserve loss rate of seeds with increasing the time

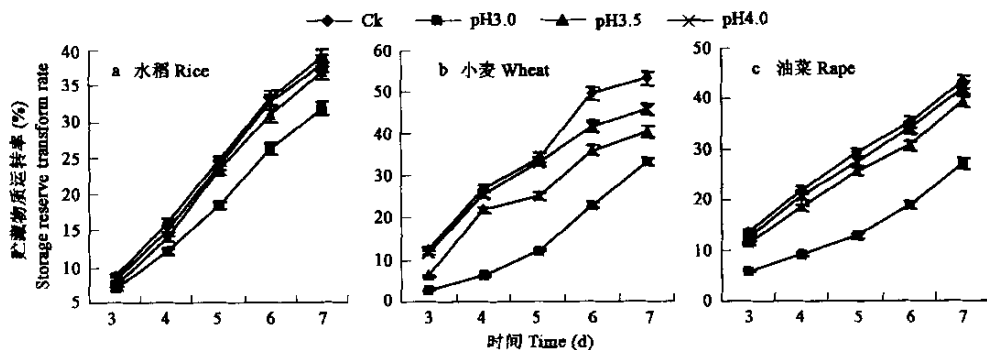


图 2 酸雨胁迫时间对种子贮藏物质运转率影响

Effect of acid rain on storage reserve transformation rate of seeds with increasing the time



**2.3.3 胁迫时间对种子根长抑制指数的影响** 图 3 数据表明,随酸雨胁迫时间( $t=d$ )延长,水稻、小麦及油菜种子根长抑制指数(下称“抑制指数”)增加,且始终 $>CK$ 。当  $t=7$  d 时,不同胁迫强度下抑制指数与抑制指数增(减)幅的变化规律是水稻(67.86%、36.49%、0.92%、4.41%、4.31%、-8.18%) $<$ 小麦(84.43%、43.38%、3.15%、6.33%、8.62%、-9.03%) $<$ 油菜(88.26%、44.32%、17.8%、8.48%、14.68%、12.52%)。由 3 者抑制指数的变化特点可以断定,酸雨对水稻胚根生长的抑制程度 $<$ 小麦 $<$ 油菜,或水稻种子萌发抗酸雨胁迫伤害的能力 $>$ 小麦 $>$ 油菜。再从 CK 与胁迫强度(pH)抑制指数达到差异显著水平的胁迫时间看,3 类种子均为 3 d,暗示该萌发过程对酸雨胁迫的反应比消耗率与运转率敏感。而  $t=7$  d 时,3 者 CK 与处理(pH4.0)间差异显著性下降的事实仍可看出,其抗酸雨胁迫能力排序是水稻 $>$ 小麦 $>$ 油菜。

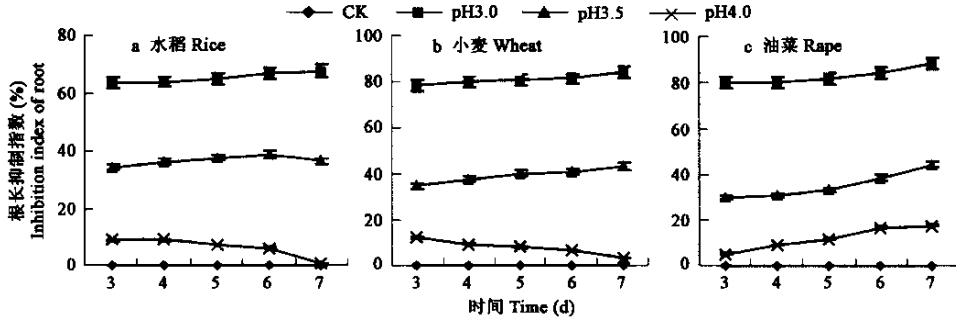


图 3 酸雨胁迫时间对种子根长抑制指数影响

Fig. 3 Effect of acid rain on inhibition index of root length of seeds with increasing the time

**2.3.4 胁迫时间对种子芽长抑制指数的影响** 图 4 数据指出,伴随酸雨胁迫时间( $t=d$ )增加,3 类种子芽长抑制指数的变化趋势不尽一致,水稻为低高低,小麦基本是由高至低,油菜是低至高(pH3.0)和高至低,且芽长抑制指数始终 $>CK$ 。从处理与 CK 的芽长抑制指数大小与其最大增(减)幅变化看, $t=7$  d 时,水稻(16.37%、11.63%、0.84%、-8.73%、-6.71%、-5.46%) $<$ 小麦(46.49%、15.43%、3.72%、-9.62%、-7.09%、-6.16%) $<$ 油菜(58.5%、17.51%、5.76%、10.88%、-15.66%、-8.07%)。由此推断,水稻胚芽生长受酸雨胁迫的抑制程度 $<$ 小麦 $<$ 油菜。此时 CK 与处理(pH4.0)差异显著性下降的事实同样证明,3 者抗酸雨胁迫能力也是水稻 $>$ 小麦 $>$ 油菜。由 CK 与胁迫强度(pH)芽长抑制指数达到差异显著水平所需胁迫时间皆为 3 d 分析,3 类种子胚芽生长对酸雨胁迫反应的敏感性 $>$ 消耗率与运转率。

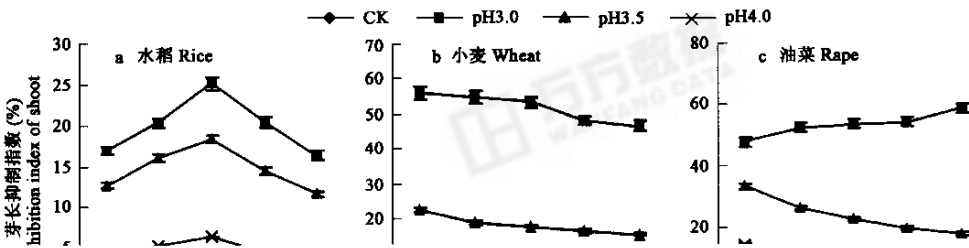


图 4 酸雨胁迫时间对种子芽长抑制指数的影响

Fig. 4 Effect of acid rain on inhibition index of shoot length of seeds with increasing the time

3 讨论

**3.1 水稻、小麦和油菜种子萌发对酸雨胁迫强度的响应明显不同,其差别主要表现在伤害阈值、降(增)幅及变幅 3 个方面:**

(1) 从伤害阈值看, pH2.0~2.5 酸雨完全抑制 3 种植物萌发,表现为发芽率(势)、发芽(活力)指数为零,这与胁迫强度(pH)过高,胁迫时间过长( $t=7$  d)引起胚细胞死亡有关。当胁迫强度  $pH \geq 3.0$  后,正常萌发反应呈现,且水稻阈值( $pH3.0 \sim 3.5$ ) $<$ 小麦(3.0~4.0) $<$ 油菜( $pH4.0 \sim 5.0$ )。

(2) 在  $pH \leq 3.0$  时,水稻、小麦与油菜种子萌发(含芽状发芽率)响应酸雨胁迫的 5 项萌发指标降(增)幅明显不同,与各自

CK 相比,水稻降(增)幅(0.67%~35.9%)<小麦(6.00%~46.00%)<油菜(8.67%~47.65%)。

(3)在 pH3.0~5.0 范围内,水稻、小麦与油菜种子上述 5 项萌发指标的变幅是水稻(3.34%~35.9%)<小麦(9.33%~51.60%)<油菜(10.67%~54.71%)。说明酸雨对水稻萌发的影响<小麦<油菜,或水稻对酸雨的抗性>小麦>油菜,此与冯宗炜等人<sup>[8]</sup>3 类植物抗性划分的结论完全吻合,与彭彩霞等人<sup>[4]</sup>酸雨影响小麦种子萌发不显著的报道相悖。

进一步研究发现,酸雨胁迫下种子生理生化过程改变是造成萌发响应差异的内在原因:①对表 2 数据相关分析发现,水稻、小麦与油菜种子萌发的 6 项生理指标与 pH 呈明显正(或负)相关,说明此时 3 类种子生理活动严格受酸雨调控;②就响应程度而言,水稻在伤害阈值、降(增)幅及变幅 3 方面的改变明显<小麦<油菜,反映出水稻对酸雨耐受性高于油菜;③呼吸强度(能量代谢),吸水值(水分代谢),储藏物质消耗、运输(利用)为控制种子萌发的重要生理过程,影响原生质状态、酶的活化与合成、能量代谢、细胞、组织与器官构建或修复。酸雨胁迫下,水稻 3 者间消长变化协调良好,如随 pH 上升(酸性减弱),呼吸由弱变强,储藏物质消耗分解加快、外输增加,满足胚根(芽)生长或修复所需,以至胚根(芽)抑制指数迅即递减(表 2)。油菜 3 者间变化态势与前不同,即随 pH 上升、呼吸强度增强,储藏物质消耗分解下降,但始终>CK,外输递增,增幅<水稻。呼吸增强,消耗分解增加,外输减少,导致胚根(芽)生长所需物质匮乏,以致胚根(芽)抑制指数递减缓慢。随胁迫减弱,储藏物质外运增加,对胚根(芽)生长抑制减缓,抑制指数降低。推测此与低 pH(2.0~3.0)条件下,种子代谢出现紊乱,储藏物质主要用于受损胚细胞的生理修复过程等有关<sup>[15,16]</sup>。

3.2 3 类抗性种子萌发对酸雨胁迫时间( $t=d$ )的响应方式不尽一致,其差异主要表现在贮藏物质消耗(运转)率,根(芽)长抑制指数 4 项指标变幅及响应胁迫时间的长短上。首先,从贮藏消耗率对胁迫时间的响应看,虽然 3 类种子消耗率都随胁迫时间延长而增加,但生态生理学含义明显不同。水稻、小麦增幅始终<CK(图 1),结合胁迫时间对根(芽)抑制指数影响分析,消耗率下降导致可供胚根(芽)生长的物质减少,使后者生长受抑。相反,油菜消耗率增幅>CK(图 1),但依其酸雨胁迫下运转率始终<CK 的事实推断,这是酸雨伤害种子胚乳与胚细胞,造成代谢网络瓦解,呼吸耗能增加的表现。从对物质与能量利用角度看,后者响应胁迫时间变化对种子贮藏物质消耗产生的负面效应>水稻与小麦。酸雨胁迫下,3 类种子贮藏物质消耗均达差异显著水平的时间是水稻(7 d)>小麦(6 d)>油菜(3 d)。即水稻对酸雨胁迫时间响应最迟,小麦次之,油菜最早;其次,3 类种子贮藏物质运转率响应胁迫时间的规律是水稻种子增幅<小麦(且小于各自 CK)。至于油菜种子运转率增幅(21.09%、26.30%、28.8%)<水稻和小麦,可能与其贮藏物质消耗过高、外输减少有关(图 1、图 2),反映的生态学信息仍是其耐酸雨能力<水稻<小麦。作为佐证的是 3 类种子运转率皆达差异显著水平时间还是水稻(7 d)>小麦(6 d)>油菜(4 d),表现为水稻对酸雨胁迫时间响应最迟,小麦次之,油菜最早。由此从胁迫时间与储藏物质消耗率及运转率关系上阐释了 3 类种子抗酸雨胁迫能力分异的原因。

根长抑制指数表征了酸雨胁迫时间对种子胚根与根系生长的影响(图 3),而植物地下、地上生长相关的事实暗示酸雨对根系生长发育的阻滞作用势必延伸到胚芽(图 4)。研究证实,当胁迫强度(pH)是 3.0、胁迫时间为 7 d 时,3 类种子根(芽)长的抑制指数是水稻(68.0%、17.0%)<小麦(85.0%、47.0%)<油菜(88.0%、59.0%),根长与芽长抑制指数虽同步增加,但不是简单的线性关系;从 3 者对胁迫时间的响应分析,虽皆为 3 d,但第 7 d 时,水稻 2 项抑制指数与 CK 差异不显著(图 3、图 4),说明水稻根系与胚芽生长响应酸雨胁迫时间的变化幅度<小麦<油菜,亦即 3 类种子萌发对酸雨胁迫的抗性是水稻>小麦>油菜;再由胚根(芽)生长对酸雨胁迫时间反应时间( $t=3 d$ )<贮藏物质消耗与运转( $t=7\sim 3 d$ )的情况分析,前者对酸雨胁迫的敏感性>后者。此与根、芽器官建成时,细胞分裂、生长需要大量代谢能量和结构与功能物质供应等因素有关。

此外,3 类抗性种子萌发响应酸雨胁迫的生理阈值( $pH\geq 2.0$ )<萌发阈值( $pH\geq 3.0$ )的事实,间接说明时间进程对种子萌发的影响,启示人们在酸雨防治实践中,如能及时采取补救措施降低土壤环境酸度,或可在一定程度上逆转酸雨对种子萌发的影响,减少其给农业生产造成的经济损失。

#### 4 结论

- (1) 酸雨胁迫强度( $pH=2.0\sim 2.5$ )时,因胁迫强度过高,3 类抗性种子皆不萌发;
- (2) 胁迫强度( $pH\geq 3.0$ )时,3 类抗性种子 5 项萌发指标的变幅是水稻<小麦<油菜;酸雨伤害阈值是水稻( $pH3.0\sim 3.5$ )<小麦( $pH3.5\sim 4.0$ )<油菜( $pH4.0\sim 5.0$ );
- (3) 胁迫强度( $pH\geq 2.5$ )时,3 类抗性种子 6 项生理指标的变幅是水稻<小麦<油菜,其生理反应阈值( $pH\geq 2.0$ )<萌发反应阈值( $pH\geq 3.0$ );
- (4) 3 类抗性种子贮藏消耗率、运转率,根长抑制指数、芽长抑制指数对酸雨胁迫时间的响应时间是水稻(7 d、7 d、3 d、3 d)>小麦(6 d、6 d、3 d、3 d)>油菜(3 d、4 d、3 d、3 d);
- (5) 3 类抗性种子对酸雨胁迫强度与胁迫时间的耐受性差异(水稻>小麦>油菜)是其抗性分异的根本原因。

#### References: 万方数据

[1] Bosley A, Petersen R, Rebbeck J. The resistance of the moss *Polytrichum commune* to acute exposure of simulated acid rain or ozone

compared to two fern species; Spore germination. *Bryologist Winter*, 1998, **101**(4): 512~518.

- [ 2 ] Park J B, Lee S. Growth responses of *Arabidopsis thaliana* exposed to simulated acid rain. *Journal of the Korean Society for Horticultural Science*, 1999, **40**(1):146~151.
- [ 3 ] Hou B F, Yi H W. Effects of simulated acid rain on germination, foliar damage, chlorophyll contents and seedling growth of five hardwood species growing in China. *Forest Ecology and Management*, 2000, **126**: 321~329.
- [ 4 ] Li R S, Hu Z S, Shi Z J. Effect of simulated acid rain on germination of seed ipomoea aquatic forsk. *Agro-environment Protection*, 2000, **23**(6): 637~639.
- [ 5 ] Nie C R, Chen S G, Wen Y H, *et al.* Effect of acid rain on seed germination and seedling growth of peanut. *Chinese journal of oil crop sciences*, 2003, **25**(1): 35~36.
- [ 6 ] Peng C X, Peng C L, Lin G Z, *et al.* Effects of Simulated Acid Rain on Seed Germination and Seedling Growth of Three Crops. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2003, **11**(4): 400~404.
- [ 7 ] Kang H, Lee W S. Responses of maternal siblings of *Pinus densiflora* to simulated acid rain. *Plant Biology*, 2001, **44**(3): 131~140.
- [ 8 ] Feng Z W, Cao H F, Zhou X P. The effects of acid deposition on ecosystem and restoration techniques. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1999. 2~3.
- [ 9 ] Zhang Y M, Wu L Y, Wang X X, *et al.* Effects of acid rain on leaf injury and physiological characteristics of crops. *Agro-environmental Protection*, 1996, **15**(5):197~208,227.
- [ 10 ] Yan Q C. *Principles and techniques for seeds testing*. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2001. 2, 66, 102
- [ 11 ] Fang N H, Hong F S, Zhao G W, *et al.* Effect of rare earth on the seed vigor and the amounts of absorbing water. *Chinese Rare Earths*, 2000, **21**(4): 52~54.
- [ 12 ] He R X, Wang Y G, Zhang S C. Measurement of plant tissue respiratory rate with the conductivity meter. *Shanxi Agric. Univ.*, 1997, **17**(2): 165~167.
- [ 13 ] Liu H S, Li Y L, Wang D Q, *et al.* Changes of physiological and biochemical characteristics of different S<sub>22</sub>genotypes maize during seed germination. *Plant Physiol. Commun.*, 1999, **35**(1): 15~17.
- [ 14 ] Ren A Z, Gao Y B. Effects of single and combinative pollutions of Lead, Cadmium and Chromium on the germination of *Brassica chinensis* L. *Chinese Journal of Ecology*, 2000, **19**(1): 19~22.
- [ 15 ] Gao J X, Cao H F, Shu J M. The Effects of Acid Rain on Plant Metabolism. *Research of Environmental Sciences*, 1996, **9**(4): 41~45.
- [ 16 ] Zhou Q, Huang X H, Zhang Y, *et al.* Effect of cerium on seed germination under acid rain. *Journal of Rare Earths*, 2002, **18**(4): 298~300.

#### 参考文献:

- [ 4 ] 李荣生, 胡哲生, 时忠杰. 模拟酸雨对蕹菜种子发芽的影响. *农业环境保护*, 2001, **20**(5): 355~356, 365.
- [ 5 ] 聂呈荣, 陈思果, 温玉辉, 等. 模拟酸雨对花生种子萌芽及幼苗生长的影响. *中国油料作物学报*, 2003, **25**(1): 35~36.
- [ 6 ] 彭彩霞, 彭长连, 林桂珠, 等. 模拟酸雨对农作物种子萌发和幼苗生长的影响. *热带亚热带植物学报*, 2003, **11**(4): 400~404.
- [ 8 ] 冯宗炜, 曹洪法, 周修萍, 著. 酸沉降对生态环境的影响及其恢复技术. 北京: 中国环境科学出版社, 1999. 2~3.
- [ 9 ] 张耀民, 吴丽英, 王晓霞, 等. 酸雨对农作物叶片伤害及生理特性影响. *农业环境保护*, 1996, **15**(5): 197~208, 227.
- [ 10 ] 颜启传, 主编. 种子检验原理和技术. 杭州: 浙江大学出版社, 2001. 2, 66, 102.
- [ 11 ] 方能虎, 洪法水, 赵贵文. 稀土元素对水稻种子萌发活力、吸水量和膜透性的影响. *稀土*, 2000, **21**(4): 52~54.
- [ 12 ] 贺润喜, 王玉国, 张石城. 用电导仪测定植物组织呼吸速率. *山西农业大学学报*, 1997, **17**(2): 165~167.
- [ 13 ] 刘华山, 李玉玲, 王德勤, 等. 不同 S<sub>22</sub>基因型玉米种子萌发过程中的生理生化特性变化. *植物生理学通讯*, 1999, **35**(1): 15~17.
- [ 14 ] 任安芝, 高玉葆. 铅、镉、铬单一和复合污染对青菜种子萌发的生物学效应. *生态学杂志*, 2000, **19**(1): 19~22.
- [ 15 ] 高吉喜, 曹洪法, 舒俭民. 酸雨对植物新陈代谢的影响. *环境科学研究*, 1996, **9**(4): 41~45.